跑速对男性大学生下肢关节负荷特征的影响

明安华[1]，何辉[1]，杨帆[2,3]，马瑞雅[2,3]，冯茹[3]，李淑杰[4]

（1. 北京体育大学中国运动与健康研究院，100084 北京；2. 李宁运动科学研究中心，101111 北京；
3. 北京体育大学运动人体科学学院，100084 北京；4. 北京体育大学管理学院，100084 北京）

摘　要：比较不同跑速下膝关节和踝关节屈伸峰值力矩、峰值功率、关节做功、关节冲量矩以及单位距离关节累积冲量矩等指标的变化，旨在探讨不同跑速对下肢关节单次触地负荷和累积负荷特征的影响。选择12名青年男性大学生为受试者，使用VICON红外高速运动捕捉系统、Bertec Fit三维测力跑台同步采集8 km/h、10 km/h、12 km/h和14 mk/h共4个速度下跑步膝关节和踝关节的动力学参数，分析膝关节和踝关节屈伸峰值力矩、峰值功率、做功、冲量矩和单位距离关节累积冲量矩等指标。结果表明，支撑期踝关节跖屈峰值力矩、落地缓冲期和离地蹬伸期峰值功率、踝关节做功均随速度的增加显著增加（$P<0.05$），而膝关节伸膝峰值力矩、峰值功率和做功随着速度的增加均无显著变化（$P>0.05$）；跑步1 km时膝关节和踝关节的累积冲量矩随着速度的增加均显著减小（$P<0.05$），膝关节和踝关节单步冲量矩随着速度的增加无显著变化（$P>0.05$）。跑速增加不会影响男性大学生踝关节和膝关节单次触地冲量矩，但会减小跑步者膝关节和踝关节单位距离累积冲量矩；跑速增加，男性大学生踝关节跖屈峰值力矩、峰值功率、关节做功显著增加。因此在一定速度范围内，跑速增加并不会增加膝关节受伤风险，而跑速对踝关节的影响有待进一步研究。

关键词：跑速；膝关节；踝关节；累积负荷；生物力学

中图分类号：R873　　　　**文献标志码**：A

Effect of running speed on lower extremity joint load in male college students

MING Anhua[1]，HE Hui[1]，YANG Fan[2,3]，MA Ruiya[2,3]，FENG Ru[3]，LI Shujie[4]

（1. China Institute of Sports and Health, Beijing Sport University，100084 Beijing，China；
2. Li Ning Sports Science Research Center，101111 Beijing，China；
3. School of Sport Science, Beijing Sport University，100084 Beijing，China；
4. School of Management, Beijing Sport University，100084 Beijing，China）

Abstract：The changes of peak flexion and extension moments，peak power，joint work，joint impulse moments，and cumulative joint impulse moments per unit distance of knee and ankle joints at different running speeds were compared to explore the effects of different running speeds on the single touchdown load and cumulative load characteristics of lower limb joints. Twelve young male college students were recruited as subjects，and the kinetic parameters of their knee and ankle joints were collected simultaneously using

收稿日期：2021-01-05　　　　**修回日期**：2022-02-11

通信作者：何辉，副研究员。E-mail：he_hui0402@126.com

引用格式：明安华，何辉，杨帆，等．跑速对男性大学生下肢关节负荷特征的影响[J]．应用力学学报，2022，39(2)：224-230.
MING Anhua，HE Hui，YANG Fan，et al. Effect of running speed on lower extremity joint load in male college students[J]. Chinese journal of applied mechanics，2022，39(2)：224-230.

VICON infrared high-speed motion capture system and Bertec Fit 3D ergometer at four speeds of 8 km/h, 10 km/h, 12 km/h and 14 km/h. The peak flexion and extension moments, peak power, joint work, impulse moments and joint cumulative impulse moments per unit distance of knee and ankle joints were analyzed. The results show that the plantarflexion peak moment of the ankle during the support period, the peak power during the landing cushion period and the off-ground pedal extension period and the joint work by the ankle joint all increase significantly ($P<0.05$) with the increase of speed. But, the peak extension moment, peak power and joint work of knee during the support period do not change significantly ($P>0.05$) with the increase of speed. The cumulative impulse moments of the knee and ankle joints during the 1 km run decreased significantly ($P<0.05$) with the increase of speed, and the single step impulse moments of the knee and ankle joints do not change significantly ($P>0.05$). The increase of running speed do not affect the single touchdown impulse moments of the ankle and knee in male college students, but it can reduce the cumulative impulse moments per unit distance of the knee and ankle joints. The plantarflexion peak moment, peak power, and joint work in the ankle joint in male college students increase significantly with the increase of running speed. Therefore, within a certain speed range, the increase in running speed does not increase the risk of knee, while the effect of running speed on the ankle needs further study.

Key words: running speed; knee joint; ankle joint; cumulative load; biomechanics

在追求健康生活方式的运动中,跑步已经成为一种非常流行的体育活动形式[1]。近年来,我国每年超过 500 万人次参加跑步赛事[2]。每年由跑步导致的损伤发生率高达 40% ~50%[1,3],而跑步导致的损伤中有 70% 是膝关节及膝关节以下部位,其中,膝关节(28%)、足踝(26%)和小腿(16%)[4-5]。跑步导致的下肢损伤主要是由于人体组织(肌肉、肌腱和骨骼)过度使用造成的,多为过劳性损伤[6-7]。有研究发现,关节负荷与过劳性损伤有密切的关系[8]。在生物力学研究中,常采用关节峰值力矩、关节功率、关节做功等指标评价关节负荷。最近,累积负荷(cumulative load)的概念被引入,用于分析给定跑步距离或持续单位时间内下肢关节负荷变化[7,9]。累积负荷是指单次触地负荷与触地次数的乘积,而单次触地负荷是指关节接触力或者关节力矩与单位时间的积分值。本研究采用冲量矩作为评价单次触地负荷的指标,而采用累积冲量距作为评价累积负荷的指标。有研究发现,跑步速度在 9 km/h ~16 km/h 范围内[10-11],膝关节关节力矩峰值随着速度的增加而增加[12-13],而膝关节冲量矩并无明显变化[7,9]。冲量矩与关节力矩峰值相比,能有效反映整个支撑期关节负荷情况,而累积冲量矩可以更好地解释不同跑速下单位距离触地时间与触地次数对下肢负荷的影响;因此,累积冲量矩成为跑步生物力学研究中的流行指标[14]。目前,只有较少研究报道了不同跑速对膝关节冲量矩的影响,但未见研究报道不同跑速对踝关节单次触地冲量矩和累积冲量矩的影响。

本研究对不同跑速的下肢膝关节和踝关节屈伸峰值力矩、峰值功率、关节做功、单次触地冲量矩以及单位距离的累积冲量矩变化特征进行研究,旨在探讨跑速对下肢关节负荷的影响,为科学跑步和预防跑步损伤提供理论依据。

1 研究方法

1.1 受试者

选取 12 名北京体育大学普通在校男大学生为受试者,年龄(23.6 ±2.3)岁,身高(178.4 ±5.4)cm,体质量(73.2 ±9.2)kg,BMI(23.0 ±2.5)kg/m²。所有受试者均无专业训练经历,跑步时均为足跟着地,且近半年内无下肢受伤史、过往无重大疾病史,身体状况良好。实验前 24 h 未从事剧烈运动,知悉实验目的和步骤,且签署实验知情同意书。本实验已经获得北京体育大学运动科学实验伦理委员会批准书,批准号:2020101H。

1.2 数据采集

本实验数据采集在李宁运动科学研究中心实验室完成,采用 11 镜头三维红外摄像及高速运动捕捉系统(VICON MX-T020, Oxford Metrics Ltd, Oxford, UK,采集频率为 250 Hz)采集运动学参数。红外高

速运动捕捉系统拍摄范围约为 4 m×3 m×2 m；采用三维测力跑台(Bertec Fit, Bertec Corporation, Columbus, Ohio, USA, 采集频率为 2 kHz)采集力学参数；使用 VICON 数据采集软件 Nexus 2.6 同步采集动作捕捉系统的运动学参数及测力台动力学参数。

1.3 实验准备与流程

受试者身穿紧身短裤和习惯穿的跑鞋，根据贴点方案在受试者身上粘贴反光标志点。为保证贴点准确性，所有受试者均由同一实验人员粘贴。使用大腿跟踪板和小腿跟踪板分别确定大腿坐标系、小腿坐标系。反光标志点的位置为头部 4 点、腕、肘、肩峰、髂前上棘、髂后上棘、大腿跟踪板、膝内、膝外、小腿跟踪板、踝内、踝外、第 1 跖趾关节、第 5 跖趾关节、足跟三跟踪点等双侧共 54 个点。

测试前，受试者进行充分热身，并在三维跑台上进行适应性练习。受试者在三维测力跑台上分别完成 8 km/h、10 km/h、12 km/h 和 14 km/h 速度跑。测试开始，受试者站在三维测力跑台上，身体直立，面向前方，两眼平视正前方；两足开立，足尖向前；双上肢侧平举，掌心向前，保持静止。操作人员在确定能够拍到全部反光标志点后，拍摄 2 s。静态动作拍摄结束摘除膝、踝处的反光标志点，进行跑步动态数据采集。受试者在测力跑台上从静止加速，加速 15 s 后达到目标速度，在目标速度稳定 15 s 后，利用 Vicon Nexus 2.6 软件同步采集稳定阶段 15 s 的运动学和动力学参数。上一速度采集结束后，使用主观体力感觉评分表(RPE)观察受试者恢复情况，当受试者主观体力感觉等级为 9 时(很轻松)，进行下一速度测试。

1.4 数据处理

本实验选取受试者右腿一个完整步态周期(包括支撑期和摆动期)进行数据处理分析[15]。支撑期为右脚脚跟接触测力跑台瞬间至该脚脚尖离开测力跑台瞬间。摆动期为右脚脚尖离开测力台瞬间至该脚再次接触测力跑台瞬间[16]。动力学数据主要分析支撑期数据。使用英国 VICON 红外高速运动捕捉系统 Nexus 2.6 软件对采集的运动学数据进行 12 Hz Butterworth 低通数字滤波器滤波[17]，并导出 C3D 文件；使用美国 C-Motion 公司开发的 Visual 3D 软件对动力学数据进行 30 Hz Butterworth 低通数字滤波[18]。利用 Visual 3D 软件对运动学和动力学数据进行处理。

本研究选取的力学参数包括：矢状面关节力矩、关节功率、关节做功、关节冲量矩、1 km 累积冲量矩。其中关节力矩采用逆动力学方法计算[18]，并相对体质量进行标准化处理。关节力矩与关节角速度之积为关节功率，关节功率对时间积分为关节做功。对正功率阶段进行时间积分得到离地蹬伸期做正功之和，即为该关节处释放能量；对负功率阶段进行时间积分得到落地缓冲期做负功之和，即为该关节处吸收能量。关节冲量矩定义为支撑期关节力矩对触地时间的积分[7]，即

$$I = \int_0^T M(t)\,dt$$

式中：M 为关节力矩；T 为触地时间。关节力矩使用绝对值进行计算。

1 km 关节冲量矩计算为单次触地关节冲量矩与跑 1 km 右脚触地次数的乘积，是本研究评价单位距离负荷评价指标[19]。计算公式为

$$I_C = n \times I,$$

$$n = \frac{1}{T_{GC} V}$$

式中：I_C 为 1 km 累积冲量矩；n 为 1 km 右脚触地次数；T_{GC} 为步态周期；V 为跑步速度。

1.5 数据分析

采用单因素重复测量方差分析(ANOVA)确定跑速对跑步支撑阶段膝、踝关节力矩、功率、做功、冲量矩等关节负荷指标以及 1 km 累积关节冲量矩的影响。事后速度间的两两比较检验使用 LSD 方法，统计软件为 SPSS 20.0，显著性水平 α 设为 0.05。

2 研究结果

2.1 峰值力矩

跑步速度分别为 8 km/h、10 km/h、12 km/h 和 14 km/h 时，支撑阶段膝关节和踝关节峰值力矩、峰值功率和关节做功对比如表 1 所示，触地阶段膝关节和踝关节矢状面力矩如图 1 所示。可以看出，速度对跑步支撑期膝关节伸膝峰值力矩、峰值功率和做功均无显著影响($P>0.05$)，对跑步支撑期踝关节跖屈峰值力矩具有显著影响($P<0.001$)。事后检验结果表明，在跑步速度为 12 km/h 和 14 km/h 时，踝关节跖屈峰值力矩均大于 8 km/h($P=0.001$，

$P<0.001$),在 14 km/h 跑步时踝关节跖屈峰值力矩大于 10 km/h($P=0.003$)。

表 1　支撑阶段膝关节和踝关节峰值力矩、峰值功率和关节做功对比

Tab. 1　Comparison of peak moment, peak power and joint work of knee and ankle joints during the support phase

V/(km·h⁻¹)	峰值力矩/(Nm·kg⁻¹)		峰值功率+/(W·kg⁻¹)		峰值功率−/(W·kg⁻¹)		做功+/(J·kg⁻¹)		做功−/(J·kg⁻¹)	
	膝关节	踝关节	膝关节	踝关节	膝关节	踝关节	膝关节	踝关节	膝关节	踝关节
8	3.01±0.78	−1.82±0.39	4.93±2.16	7.44±2.02	−10.10±2.73	−2.15±1.15	0.31±0.15	0.75±0.17	−0.53±0.22	−0.12±0.07
10	3.28±0.80	−2.17±0.44	5.89±2.42	11.70±4.69*	−12.02±2.88	−3.44±1.48	0.32±0.16	0.93±0.28	−0.71±0.18	−0.18±0.10
12	3.48±1.03	−2.56±0.53*	6.07±2.79	14.13±3.36*	−13.15±4.03	−4.47±1.77*	0.33±0.19	1.05±0.25*	−0.66±0.29	−0.22±0.10*
14	3.47±1.09	−2.81±0.57*#	6.50±3.47	17.58±4.87£*#	−14.28±5.62	−5.10±2.38*#	0.30±0.20	1.13±0.26#*	−0.71±0.35	−0.26±0.14*

注:+表示离地蹬伸期峰值功率和做功;−表示落地缓冲期峰值期和做功;* 表示 $V=8$ km/h 与 10 km/h、12 km/h、14 km/h 对比具有显著性差异,$P<0.05$;# 表示 $V=10$ km/h 与 12 km/h、14 km/h 对比具有显著性差异,$P<0.05$;£ 表示 $V=12$ km/h 与 14 km/h 对比具有显著性差异,$P<0.05$。

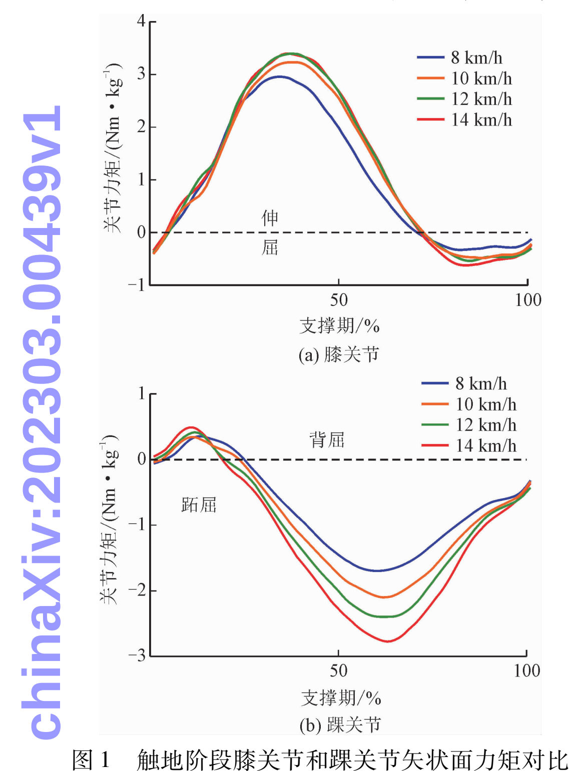


图 1　触地阶段膝关节和踝关节矢状面力矩对比

Fig. 1　Comparison of knee and ankle joints sagittal moments during the support period

2.2　峰值功率

图 2 为跑步速度分别为 8 km/h、10 km/h、12 km/h 和 14 km/h 时，在支撑期膝关节和踝关节功率。结合表 1 可以看出，速度对跑步支撑期踝关节落地缓冲阶段和离地蹬伸阶段的峰值功率均具有显著影响($P<0.001$, $P<0.001$)。事后检验结果表明，在离地蹬伸阶段，12 km/h 和 14 km/h 速度时，踝关节峰值功率均大于 8 km/h 时的峰值功率($P<0.001$, $P<0.001$); 14 km/h 速度时,踝关节峰值功率大于 10 km/h 和 12 km/h 时的峰值功率($P=0.001$, $P=0.036$);在 10 km/h 速度时,踝关节峰值功率大于8 km/h的峰值功率($P=0.011$);只有在 10 km/h 和 12 km/h 速度时,踝关节峰值功率无显著性差异($P=0.136$)。落地缓冲阶段,在 12 km/h 和 14 km/h 速度时的踝关节峰值功率均大于 8 km/h 时的踝关节峰值功率($P=0.002$, $P<0.001$);14 km/h 速度时,踝关节峰值功率大于 10 km/h 时的踝关节峰值功率($P=0.003$)。

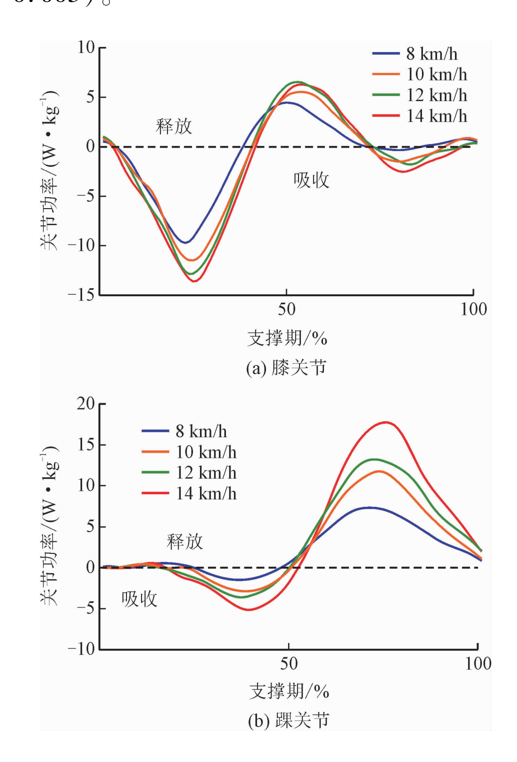


图 2　在支撑期膝关节和踝关节功率对比

Fig. 2　Comparison of knee and ankle joints power during the support period

2.3　关节做功

速度对踝关节落地缓冲阶段和离地蹬伸阶段做功都具有显著影响($P=0.017$, $P=0.002$)。事后检

验结果表明，在离地蹬伸阶段，12 km/h 和 14 km/h 速度时的踝关节做功均大于 8 km/h 时的做功（$P=0.004$，$P<0.001$）；而 14 km/h 速度时的踝关节做功大于 10 km/h 时的做功（$P=0.047$）。在落地缓冲阶段，12 km/h 和 14 km/h 速度时的踝关节做功均大于 8 km/h 时的踝关节做功（$P=0.028$，$P=0.002$）。

2.4 关节冲量矩

跑步速度分别为 8 km/h、10 km/h、12 km/h 和 14 km/h时，膝关节和踝关节每步冲量矩和 1 km 累积冲量矩对比如表 2 所示。可以看出，速度对膝关节、踝关节单步冲量矩均无显著影响（$P=0.858$，$P=0.714$）。而不同跑速对 1 km 距离的膝、踝关节累积冲量矩具有显著影响（$P<0.001$）。事后检验结果表明，以 10 km/h、12 km/h 和 14 km/h 速度跑 1 km 的膝关节累积冲量矩显著小于 8 km/h 的膝关节累积冲量矩（$P=0.028$，$P<0.001$，$P<0.001$）；以 14 km/h 速度跑 1 km 的膝关节累积冲量矩显著小于 10 km/h 的膝关节累积冲量矩（$P=0.006$）。

以 10 km/h、12 km/h 和 14 km/h 速度跑 1 km 的踝关节累积冲量矩，显著小于 8 km/h 时的累积冲量矩（$P=0.022$，$P=0.001$，$P<0.001$）；同样，以 14 km/h速度跑 1 km 踝关节累积冲量矩，显著小于 10 km/h 时的累积冲量矩（$P=0.036$）。

表 2 膝关节和踝关节每步冲量矩和 1 km 累积冲量矩对比

Tab. 2 Comparison of knee and ankle joints impulse moments per step and 1 km cumulative impulse moment

$V/(km \cdot h^{-1})$	1 km 触地次数	每步冲量矩/($Nm \cdot s \cdot kg^{-1}$)		1 km 冲量矩/($Nm \cdot s \cdot kg^{-1}$)	
		膝关节	踝关节	膝关节	踝关节
8	640.09 ± 24.27	0.370 ± 0.10	0.28 ± 0.06	235.61 ± 59.59	181.79 ± 41.03
10	511.90 ± 19.65 **	0.371 ± 0.10	0.29 ± 0.07	189.50 ± 47.07 *	149.64 ± 31.82 *
12	440.41 ± 15.81 ** ##	0.356 ± 0.11	0.31 ± 0.08	156.43 ± 47.68 *	135.35 ± 30.77 *
14	386.89 ± 11.61 ** ##££	0.338 ± 0.12	0.31 ± 0.07	130.36 ± 43.19 * #	120.39 ± 27.05 # *

注：* 表示 $V=8$ km/h 与 10 km/h、12 km/h、14 km/h 对比具有显著性差异，$P<0.05$；# 表示 $V=10$ km/h 与 12 km/h、14 km/h 对比具有显著性差异，$P<0.05$；£ 表示 $V=12$ km/h 与 14 km/h 对比具有显著性差异，$P<0.05$。

3 分析讨论

目前关于跑步负荷的相关研究，主要集中在单次触地的膝关节负荷，其中多使用峰值力矩对下肢关节负荷进行量化研究[12-13]，而关节力矩是时刻值，不能完整地反映跑步支撑期下肢关节的负荷变化情况；同时，单位距离累积冲量矩可以更好地解释不同跑速下单位距离触地时间与触地次数对下肢负荷的影响。目前，关于不同速度对膝关节和踝关节单次触地负荷和累积负荷的影响尚不清楚。因此，本研究通过计算关节力矩与触地时间的积分[7]获得单次触地的关节冲量矩值，单次触地关节冲量矩与单位距离的触地次数乘积获得累积冲量矩，从而探讨不同跑速对下肢关节单次触地负荷和累积负荷特征的影响。

本研究结果显示，在 4 个速度范围内，膝关节和踝关节单步冲量矩随着速度的增加无显著变化，而经过 1 km 膝关节和踝关节的累积冲量矩[19]，随速度的增加均显著减小，分别减少了 17.9% 和 12.76%。速度变化不会导致单次触地膝关节和踝关节冲量矩改变。这可能是因为速度从 8 km/h 增加到 14 km/h，虽然单次触地膝关节和踝关节的峰值力矩分别增加了 3% 和 13%，但触地时间减小了 23%，减小的触地时间抵消了膝关节和踝关节的关节力矩增加量；所以使得膝关节和踝关节的单次触地冲量矩并没有随着速度的增加而增加。Petersen 等[7]研究同样发现休闲跑者速度从 8 km/h 增加到 16 km/h，膝关节单次触地冲量矩不变，跑步速度不会影响膝关节单次触地冲量矩的变化；但未对踝关节的单次触地冲量矩和单位距离冲量矩进行研究。长距离耐力跑步中，踝关节同样是损伤的常见部位，前人对踝关节的研究多集中在速度对踝关节跖屈峰值力矩的影响，当速度从慢跑增加约 30% 时，踝关节跖屈力矩增加[13]。本研究速度虽然从 8 km/h 增加到 14 km/h，踝关节跖屈峰值力矩显著增加 13%，同样具有显著性变化，但踝关节的单次触地冲量矩未显著增加。这可能是因为本研究的速度较低，随着速度的增加，踝关节产生的跖屈峰值力矩增加量被显著减小的触地时间抵消，不足以使单次触地的踝关节的冲量矩的增加。本研究还发现，除了踝关节跖屈力矩峰值随着速度的增加显著增加外，踝关节的

峰值功率和关节做功随速度的增加均显著增加,而且踝关节离地蹬伸阶段峰值功率是落地缓冲阶段峰值功率的3.4倍,在蹬伸阶段踝关节峰值功率受速度的影响更明显。Orendurff等[20]研究休闲跑者从最慢(9.36 km/h)到最快(13.32 km/h)的跑步速度时,踝关节离地蹬伸阶段峰值功率增加了近30%,速度增加使踝关节蹬伸峰值功率极显著增加,同样踝关节落地缓冲阶段做功明显小于蹬伸阶段做功。在不同速度下,踝关节单次触地冲量矩无明显变化,而踝关节峰值力矩、峰值功率和做功均显著增加,因此在探讨不同跑速对踝关节的负荷变化情况时,应依据不同指标来确定其变化情况。

本研究还计算了1 km距离的膝关节和踝关节累积冲量矩,通过每步的关节冲量矩乘以经过1 km右脚触地次数获得单位距离的累积冲量矩。经计算发现,随着速度的增加,累积冲量矩显著减小,且以8 km/h的速度跑1 km,膝关节的累积冲量矩最大。而Miller等[9]研究普通跑步者在优选的跑步速度下,膝关节接触力峰值是步行的3倍,但单位距离的膝关节累积负荷没有区别,与本研究膝关节累积负荷随着速度的增加而显著减小的研究结果并不一致。这可能是因为Miller等选取步行和跑步两种差异较大的运动模式进行比较的结果。但可以确定的是,速度增加不会增加膝关节的累积负荷。有研究发现,膝关节峰值负荷与膝骨关节炎的发生和发展有关,但长距离的耐力跑并没有增加患膝关节炎的风险[6,21]。研究者试图用单位距离累积负荷的变化进行解释,虽然跑速增加会增加跑步的单次触地峰值力,但随着速度的增加,单位距离的触地次数减少,相对较短的触地时间和相对较少的触地次数可能抵消了单次触地峰值力的影响[9]。跑步者在较慢的跑步速度下跑过相同的距离,累积冲量矩更大,可能会增加膝关节损伤的风险[7]。而踝关节的跖屈峰值力矩随着速度的增加表现出显著增加的趋势,但单次触地时踝关节冲量矩并没有增加,经过1 km距离,单位距离踝关节累积冲量矩随速度显著降低。这可能是因为速度增加触地次数减少,踝关节每次触地的关节冲量矩并没有增加,所以踝关节累积冲量矩显著降低。综上结果,随着速度的增加,膝关节和踝关节单次触地冲量矩不会随速度的增加而增加,而1 km距离膝关节和踝关节累积冲量矩反而减小。因此,排除其他因素干扰,在长距离耐力跑步中仅通过改变跑步速度,跑步者的膝关节和踝关节累积负荷随着速度的增加而减小,在一定范围内,跑速增加可能更有益于膝关节健康,但跑速增加对于踝关节的影响应需进一步研究。

本研究由于受试者招募和测试场地等原因,只选择15名男性后足着地跑者作为实验对象,因部分测试数据缺失而剔除3名受试者,但鉴于有相关研究同样采用较少样本研究[12,14],因此本研究只分析了12名受试者的样本数据。本研究未纳入其他年龄段人群和女性受试者、以及不同路面和触地方式等因素进行研究,建议在今后进行进一步研究。本实验虽然使用逆动力学方法来计算跑步过程中的下肢关节力矩,关节功率和关节做功,也是公认的生物力学分析方法,但是这种方法提供有关肌肉功能的信息是有限的。在踝关节峰值力矩随着速度的增加而显著增加,而踝关节单次触地冲量矩却未发生改变,可能与下肢肌肉功能有关。在后续研究中,可加入肌电数据的分析,进一步分析不同跑速对下肢关节做功和肌肉放电活动的影响,从肌肉功能上解释负荷的变化原因,有效预防跑步损伤的发生。

4 结 论

跑步速度增加,不会改变踝关节和膝关节单次触地冲量矩,反而会减小单位距离膝关节和踝关节累积冲量矩;但跑速增加,跑步支撑阶段踝关节跖屈峰值力矩、峰值功率和关节做功均显著增加。因此,在一定距离的耐力跑步过程中,跑速增加并不会增加膝关节受伤风险,而跑速对踝关节的影响有待进一步研究。

参考文献

[1] FIELDS K B, SYKES J C, WALKER K M, et al. Prevention of running injuries[J]. Current sports medicine reports, 2010, 9(3): 176-182.

[2] 高瞻乐,王纯. 基于知识图谱分析跑步过程中的生物力学的变化与特征[J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(36): 5879-5888. (GAO Zhanle, WANG Chun. Biomechanical characteristics of running based on knowledge mapping[J]. Chinese journal of tissue engineering research, 2018, 22(36): 5879-5888(in Chinese)).

[3] 张力文,马云茹,朱晓兰,等. 跑鞋与着地方式对跑步损伤的影响[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1): 76-81. (ZHANG Liwen, MA Yunru, ZHU Xiaolan, et al. The influence of running shoes and foot-strike patterns on running injuries[J]. Journal of medical biomechanics, 2018, 33(1): 76-81(in Chinese)).

[4] FRANCIS P, WHATMAN C, SHEERIN K, et al. The proportion of

lower limb running injuries by gender, anatomical location and specific pathology: A systematic review[J]. Journal of sports science & medicine, 2019, 18(1): 21-31.

[5] 胡浩宇,郑依莉,王雪强. 上海国际马拉松跑者膝关节损伤情况及其影响因素分析[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(3): 297-302. (HU Haoyu, ZHENG Yili, WANG Xueqiang, et al. Analysis of knee joint injury and its influencing factors in Shanghai International Marathon Runners[J]. Chinese journal of rehabilitation medicine, 2019, 34(3): 297-302(in Chinese)).

[6] HAURET K G, BEDNO S, LORINGER K, et al. Epidemiology of exercise-and sports-related injuries in a population of young, physically active adults: A survey of military servicemembers[J]. The American journal of sports medicine, 2015, 43(11): 2645-2653.

[7] PETERSEN J, SRENSEN H, NIELSEN R. Cumulative loads increase at the knee joint with slow-speed running compared to faster running: A biomechanical study[J]. Journal of orthopaedic & sports physical therapy, 2015, 45(4): 316-322.

[8] 王俊清,张希妮,罗震,等. 步频和步长的改变对下肢生物力学的影响研究进展[J]. 中国运动医学杂志, 2020, 39(2): 138-144. (WANG Junqing, ZHANG Xini, LUO Zhen, et al. Research progress on the effect of step frequency and step length on biomechanics of lower limbs[J]. Chinese journal of sports medicine, 2020, 39(2): 138-144(in Chinese)).

[9] MILLER R H, EDWARDS W B, BRANDON S C E, et al. Why don't most runners get knee osteoarthritis? A case for per-unit-distance loads[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2014, 46(3): 572-579.

[10] SCHACHE A G, BLANCH P D, DORN T W, et al. Effect of running speed on lower limb joint kinetics[J]. Medicine & science in sports & exercise, 2011, 43(7): 1260-1271.

[11] 米奕翔,郝卫亚,胡水清,等. 不同速度条件下跑步动作的性别差异[J]. 中国运动医学杂志, 2020, 39(3): 185-193. (MI Yixiang, HAO Weiya, HU Shuiqing, et al. Gender differences in movement patterns during running with different speeds[J]. Chinese journal of sports medicine, 2020, 39(3): 185-193(in Chinese)).

[12] DAVID A C, CARPES F P, STEFANYSHYN D. Effects of changing speed on knee and ankle jointjoint load during walking and running[J]. Journal of sports sciences, 2015, 33(4): 391-397.

[13] PETERSEN J, NIELSEN R O, RASMUSSEN S, et al. Comparisons of increases in knee and ankle jointjoint moments following an increase in running speed from 8 to 12 to 16 km/h[J]. Clinical biomechanics, 2014, 29(9): 959-964.

[14] FIRMINGER C R, ASMUSSEN M J, CIGOJA S, et al. Cumulative metrics of tendon load and damage vary discordantly with running speed[J]. Medicine & science in sports & exercise. 2020, 52(7): 1549-1556.

[15] DEVITA P. The selection of a standard convention for analyzing gait data based on the analysis of relevant biomechanical factors[J]. Journal of biomechanics, 1994, 27(4): 501-508.

[16] 崔旭艳,任占兵. 跑步速度对中长跑运动员步态的影响研究[J]. 沈阳体育学院学报, 2014, 33(3): 122-126. (CUI Xuyan, REN Zhanbing. Influence of running speed on gait of the middle and long distance runners[J]. Journal of Shenyang Sport University, 2014, 33(3): 122-126(in Chinese)).

[17] YU B, GABRIEL D, NOBLE L, et al. Estimate of the optimum cutoff frequency for the butterworth low-pass digital filter[J]. Journal of applied biomechanics, 1999, 15(3): 319 – 329.

[18] WINTER D A. Biomechanics and motor control of human movement[M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

[19] FIRMINGER C R, EDWARDS W B. The influence of minimalist footwear and stride length reduction on lower-extremity running mechanics and cumulative loading[J]. Journal of science and medicine in sport, 2016, 19(12): 975-979.

[20] ORENDURFF M S, KOBAYASHI T, TULCHIN-FRANCIS K, et al. A little bit faster: Lower extremity joint kinematics and kinetics as recreational runners achieve faster speeds[J]. Journal of biomechanics, 2018, 71: 167-175.

[21] HANSEN P, ENGLISH M, WILLICK S E. Does running cause osteoarthritis in the hip or knee? [J]. The journal of injury, function, and rehabilitation, 2012, 4(5): S117-S121.

（编辑　黄崇亚）